Расчет извлечения в гидрометаллургических процессах может включать следующие типы: 1) расчет извлечения металла из исходной руды – твердое → жидкость.

2) расчет извлечения металла (цветные металлы, РЗМ) из раствора в процессе экстракции/ре-экстракции – жидкость → жидкость.

3) расчет извлечения металла (благородные металлы, РЗМ) из раствора в процессе сорбции – жидкость → твердое; десорбции – твердое → жидкость.

4) расчет извлечения полученного металла на катоде из богатого раствора.

5) комбинированная (несколько выборочных технологических стадий) или полная схема извлечения (сквозное извлечение – от руды до катодного металла)

Для золота в основном используются следующие показатели: в твердом г/т, в растворе мг/л. Для меди: в твердом %, в растворе г/л

**1. Расчет извлечения металла из исходной руды**

Данный метод может использоваться для расчета извлечения металла как из небольших навесок от 50 г при агитационном выщелачивании, так и при укрупненных лабораторных испытаниях с перколяционным выщелачиванием из навесок руды массой от сотен кг до нескольких тонн. В условиях производства данный метод применим для расчета извлечения металла в процессе чанового выщелачивания. В случаях гидрометаллургического производства методом кучного выщелачивания, данный расчет будет приблизительным, т.к. невозможно установить точную массу обрабатываемого участка отвала или кучи, а также ввиду неравномерности распределения содержания металла.

Для расчета данного показателя извлечения необходимы следующие данные: **mМе.исх.**– масса металла в навеске пробы руды или любого минерального сырья, мг, г; **СМе**– концентрация металла в продуктивном растворе, мг/л, г/л; **Vп.р-ра**– объем продуктивного раствора после выщелачивания, мл (см3), л (дм3). В начале необходимо определить массу метала в навеске.

Для меди: **mCu.исх = ωСu × mруды /100%** (1)

Пример 1: **mруды** навеска пробы 5 кг (5000 г), **ωСu** содержание меди 0,32 %

**mCu.исх = 0,32 %× 5000 г /100% = 16 г**

Для золота: содержание выражается как г/т, поэтому грамм на тонну переводим в мг/кг

**mАu.исх = ωАu × mруды** (2)

Пример 2: **mруды** навеска пробы 200 г (0,2 кг), **ωАu** содержание золота 1,5 г/т = 1,5 мг/кг

**mАu.исх = 1,5 мг/кг× 0,2 кг = 0,3 мг**

(Массы навесок зависят метода выщелачивания и типа лабораторных испытаний)

Выщелачивание с наработкой продуктивного раствора может предусматривать как несколько часов (чановое, агитация), так и несколько месяцев. В случаях однократного измерения показателя извлечения используются текущие параметры раствора. Расчет извлечения ведется по формуле:

**ЕCu = (СCu × Vп.р-ра) / mCu.исх × 100 %** (3)

Данная формула будет также применятся при использовании оборотного продуктивного раствора – повторной подачей его на выщелачивание, но с применением текущих параметров.

Пример 3: выщелачивание пробы меди велось в течение 10 дней, перколяционным методом. Исходный вес пробы 15 кг, содержание меди 0,27 %.

В начале определяется исходная масса меди в пробе по формуле (1):

**mCu.исх = 0,27 % × 15 000 г / 100 % = 40,5 г**

Извлечение меди в раствор будет рассчитываться на основании массы с учетом ежедневного изменения концентрации в растворе и объема раствора по формуле 3. Так, если концентрация меди в первый день выщелачивания составила 0,2 г/л при объеме раствора 5 л извлечение будет равно:

**ЕCu = (0,2 г/л× 5 л) / 40,5 г× 100 % = 2,47 %**

Во второй день **СCu = 0,45 г/л, Vп.р-ра = 4,85 л** то извлечение:

**ЕCu = (0,45 г/л× 4,85 л) / 40,5 г× 100 % = 5,39 %**

Дальнейшие показатели извлечение представлены в таблице 1

Таблица 1 – Пример расчета извлечения меди при 10-дневном или 10 стадийном перколяционном выщелачивании.

| **Сутки/ стадии** | **ССu, г/л** | **Vп.р-ра, л** | **Есu, %** |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 0,2 | 5,0 | 2,47 |
| 2 | 0,45 | 4,85 | 5,39 |
| 3 | 0,64 | 4,9 | 7,74 |
| 4 | 0,8 | 4,8 | 9,48 |
| 5 | 0,9 | 4,95 | 11,00 |
| 6 | 1,05 | 4,9 | 12,70 |
| 7 | 1,1 | 4,9 | 13,31 |
| 8 | 1,3 | 4,95 | 15,89 |
| 9 | 1,55 | 5,0 | 19,14 |
| 10 | 1,87 | 5,0 | 23,09 |

Методы перколяционного выщелачивания могут предполагать и более длительные сроки. Накопление концентрации металла в продуктивном растворе как правило производиться в первые дни процесса, затем чаще всего продуктивный раствор подвергается обработке экстрагентами (для меди)/сорбентами (для золота) и повторной подаче на выщелачивание (будет рассмотрено в разделе 5). Если была произведена замена выщелачивающего раствора на свежий, то последний показатель извлечения предыдущего раствора суммируется к извлечению на данный момент.

***Пример 4:*** В качестве продолжения выщелачивания пробы из Примера 3 после 10-го дня выщелачивания произведена замена раствора. Формула расчета будет аналогичной, но с дополнительным прибавлением последнего показателя извлечения предыдущего раствора, в данном случае 10-го дня **ЕCu (10)**:

**ЕCu = (СCu × Vп.р-ра) / mCu.исх × 100 % + ЕМе (10)** (4)

Концентрация меди **СCu** на 11 день составила **0,25 г/л**, объем – **4,95 л**, на 12-й день **СCu = 0,35 г/л, Vп.р-ра = 4,85 л**, то извлечение будет считаться следующим образом:

11 день **ЕCu = (0,25 г/л× 4,95 л) / 40,5 г× 100 % + 23,09 % = 25,53 %**

12 день **ЕCu = (0,35 г/л× 4,85 л) / 40,5 г× 100 % + 23,09 % = 27,28 %**

Последующее выщелачивание данным раствором проводилось еще 15 дней с накоплением концентрации. Расчеты ежедневного извлечения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Пример расчета извлечения при продолжении выщелачивания руды свежим раствором

| **Сутки/ стадии** | **ССu, г/л** | **Vп.р-ра, л** | **Есu, %** |
| --- | --- | --- | --- |
| 11 | 0,2 | 4,95 | 25,53 |
| 12 | 0,35 | 4,85 | 27,28 |
| 13 | 0,42 | 4,8 | 28,06 |
| 14 | 0,48 | 4,85 | 28,83 |
| 15 | 0,54 | 4,9 | 29,62 |
| 16 | 0,6 | 4,85 | 30,27 |
| 17 | 0,68 | 4,9 | 31,31 |
| 18 | 0,75 | 5,0 | 32,35 |
| 19 | 0,84 | 4,95 | 33,35 |
| 20 | 0,95 | 4,85 | 34,46 |
| 21 | 1,05 | 4,85 | 35,66 |
| 22 | 1,17 | 4,9 | 37,24 |
| 23 | 1,25 | 4,85 | 38,06 |
| 24 | 1,32 | 4,9 | 39,06 |
| 25 | 1,4 | 4,9 | 40,02 |

В случае дальнейшей замены раствора расчет будет вестись аналогично формуле (4), но с прибавлением уже показателя извлечения 25-го дня **ЕМе (25)**.

Расчеты извлечения по золоту производятся аналогичным образом, за исключением уровней концентраций - миллиграммы по массе в руде и миллиграммы в растворе.

**2. Расчет извлечения металла (цветные металлы, РЗМ) из раствора в процессе экстракции/ре-экстракции – жидкость → жидкость**.

В процессе экстракции/ре-экстракции происходит перенос металла органической фазой из продуктивного раствора в богатый электролит. Концентрация металла в продуктивном растворе, после контакта с органической фазой, существенно снижается. В гидрометаллургическом медном процессе, данный раствор называется рафинатом. Эффективность переноса органической фазой металла в электролит во многом зависит от емкости органики и количественного соотношения водной и органической фазы (В:О). В:О – объемные соотношения контактирующих продуктивного раствора и органики, задается уровнем потоков в экстракционных камерах или при однократном контакте соотношения объемов). Так например, при соотношении В:О = 2 : 1 на 2 л продуктивного раствора будет приходится 1 л органики. Увеличение соотношения В:О до 1 : 1 или 1 : 2 используется при высоких концентрациях меди в продуктивном растворе, чтобы избежать перенасыщения органической фазы. Гидрометаллургическое получение катодной меди представляет собой циркулирующие процессы, представленные на схеме рисунка 1.

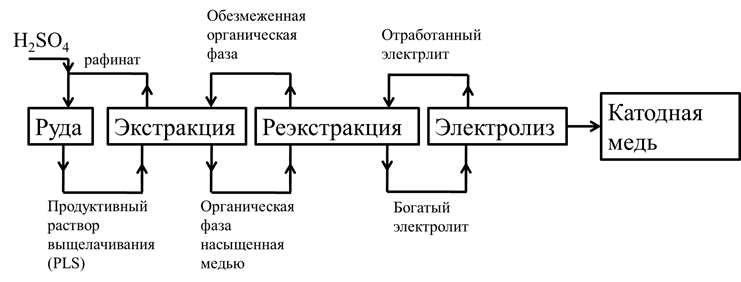


Рисунок 1 – гидрометаллургическая схема получения катодной меди.

Содержание меди в органической фазе определяется в основном по балансу водных растворов. Аналитическое содержание меди в органической фазе более сложное по сравнению с анализами водных растворов. Поэтому, извлечение меди на стадиях экстракции и ре-экстракции рассчитывается на основании баланса водных фаз: продуктивный раствор, рафинат, электролит. Расчет извлечения меди при экстракции производится по формуле (5):

**ЕCu.Ex = (Cп.р-ра – Сраф) / Cп.р-ра  × 100 %;** (5)

где Cп.р-ра – концентрация меди в продуктивном растворе, Сраф – концентрация меди в отработанном продуктивном расторе – рафинате. Так как, объемы (объемные потоки) рафината и продуктивного раствора одинаковые, в данной формуле объем **Vп.р-ра** не учитывается.

Данная формула (5), больше подходит для однократного расчета или отражения эффективности экстракционного процесса. С учетом того, что органической фазой не может производиться постоянное накопление меди и требуется перенос металла в электролит в ежедневные расчеты, включаются ре-экстракционные процессы.

При расчете извлечения (переносе меди) в электролит из продуктивного раствора необходимо учитывать ранее накопленную медь в электролите. Так, для первого дня или этапа запуска ре-экстракции формула (6) будет иметь следующий вид:

**Е1Сu (эл-т), из п. р-ра = (С1Сu(эл-т) × V1(эл-т) – С0Сu(эл-т) × V0(эл-т)) / (С1Сu(п.р-р) × V1п.р-ра) × 100 %**  (6)

где **С1Сu(эл-т) –** концентрация меди в электролите в 1-й день, г/л; **V1(эл-т) –** объем электролита в 1-й день, л; **С0Сu(эл-т) –** исходнаяконцентрация меди в электролите, в основном всегда равна 0; **V0(эл-т) –** объем исходного электролита, л; ( **С0Сu(эл-т) × V0(эл-т)** данный показатель на момент запуска обычно равен 0, если не используется какой либо электролит имеющий в составе медь); **С1Сu(п.р-р)** – концентрация меди в продуктивном растворе в 1-й день ре-экстракции, г/л; **V1п.р-ра –** объем продуктивного раствора в 1-й день, л.

Второй день или этап ре-экстракции рассчитывается по аналогичной формуле (7):

**Е2Сu (эл-т), из п. р-ра = (С2Сu(эл-т) × V2(эл-т) – С1Сu(эл-т) × V1(эл-т)) / (С2Сu(п.р-р) × V2п.р-ра) × 100 %**  (7)

где **С2Сu(эл-т) –** концентрация меди в электролите во 2-й день, г/л; **V2(эл-т) –** объем электролита во 2-й день, л; **С1Сu(эл-т) –** концентрация меди в электролите в 1-й день; **V1(эл-т) –** объем электролита в 1-й день, л; **С2Сu(п.р-р)** – концентрация меди в продуктивном растворе во 2-й день ре-экстракции, г/л; **V2п.р-ра –** объем продуктивного раствора во 2-й день, л.

Аналогичным образом рассчитываются показатели извлечения все последующие периоды.

Для вычисления извлечения меди из органической фазы потребуются более сложные формулы расчетов, включающие предварительное определение концентрации меди в богатой (насыщенной) и обедненной (обезмеженной) органических фазах.

Расчет содержания меди в обедненной (обезмеженной) органической фазе после первого запуска экстракционных процессов производится по формуле (8):

**С1Сu(орг) О = ((С1Сu(п.р-р) × V1п.р-ра – С1Сu раф × V1раф) – (С1Сu(эл-т) × V1(эл-т) – С0Сu(эл-т) × V0(эл-т))) / V1орг + С0Сu(орг) О**  (8)

где **С1Сu(п.р-р)** – концентрация меди в продуктивном растворе в 1-й день ре-экстракции, г/л; **V1п.р-ра –** объем продуктивного раствора в 1-й день, л; **С1Сu(раф)** – концентрация меди в рафинате в 1-й день экстракции, г/л; **V1раф –** объем рафината в 1-й день, л; **С1Сu(эл-т) –** концентрация меди в электролите в 1-й день; **V1(эл-т) –** объем электролита в 1-й день, л; **С0Сu(эл-т) –** концентрация меди в исходном или предыдущем электролите, если свежий то = 0; **V0(эл-т) –** объем электролита в предыдущий день, л; **V1орг** – объем органики в 1-й день, л; **С0Сu(орг) О –** концентрация меди в обедненной органике предыдущего дня (если свежая то = 0), г/л.

Второй день экстракционных процессов будет рассчитываться по аналогичной формуле с учетом предшествующих показателей электролита и обедненной органики по формуле (9):

**С2Сu(орг) О = ((С2Сu(п.р-р) × V2п.р-ра – С2Сu раф × V2раф) – (С2Сu(эл-т) × V2(эл-т) – С1Сu(эл-т) × V1(эл-т))) / V2орг + С1Сu(орг) О**  (9)

где **С2Сu(п.р-р)** – концентрация меди в продуктивном растворе во 2-й день ре-экстракции, г/л; **V2п.р-ра –** объем продуктивного раствора во 2-й день, л; **С2Сu(раф)** – концентрация меди в рафинате во 2-й день экстракции, г/л; **V2раф –** объем рафината во 2-й день, л; **С2Сu(эл-т) –** концентрация меди в электролите во 2-й день; **V2(эл-т) –** объем электролита во 2-й день, л; **С1Сu(эл-т) –** концентрация меди в 1-й день, г/л; **V1(эл-т) –** объем электролита в 1-й день, л; **V2орг** – объем органики во 2-й день, л; **С1Сu(орг) О –** концентрация меди в органике в 1-й день, г/л.

Расчет содержания в богатой органике с учетом массового баланса меди в продуктивном растворе и рафинате, объема органической фазы, а также содержания меди в обедненной органике предыдущего периода. Так, для первого дня запуска содержание меди в богатой органике будет рассчитываться по формуле (10):

**С1Сu(орг) Б = ((С1Сu(п.р-р) × V1п.р-ра – С1Сu раф × V1раф) / V1орг + С0Сu(орг) О** (10)

где **С1Сu(п.р-р)** – концентрация меди в продуктивном растворе в 1-й день ре-экстракции, г/л; **V1п.р-ра –** объем продуктивного раствора в 1-й день, л; **С1Сu(раф)** – концентрация меди в рафинате в 1-й день экстракции, г/л; **V1раф –** объем рафината в 1-й день, л; **V1орг** – объем органики в 1-й день, л; **С0Сu(орг) О –** концентрация меди в обедненной органике предыдущего дня (если свежая то = 0), г/л.

Содержание меди в богатой органике на второй день будет рассчитываться по аналогичной формуле с включением параметров первого дня соответственно:

**С2Сu(орг) Б = ((С2Сu(п.р-р) × V2п.р-ра – С2Сu раф × V2раф) / V2орг + С1Сu(орг) О** (11)

где **С2Сu(п.р-р)** – концентрация меди в продуктивном растворе во 2-й день ре-экстракции, г/л; **V2п.р-ра –** объем продуктивного раствора во 2-й день, л; **С2Сu(раф)** – концентрация меди в рафинате во 2-й день экстракции, г/л; **V2раф –** объем рафината во 2-й день, л; **V2орг** – объем органики во 2-й день, л; **С1Сu(орг) О –** концентрация меди в обедненной органике в 1-й день, г/л.

Концентрации меди в богатой органике для последующих периодов **СnСu(орг) Б** предусматривают аналогичную формулу с прибавлением концентрации обедненной органики предшествующего периода **С(n-1)Сu(орг) О**.

Расчет извлечения меди из насыщенной богатой органики в богатый электролит рассчитывается по формуле (12):

**Е1Сu (эл-т), из орг. = (С1Сu(эл-т) × V1(эл-т) – С0Сu(эл-т) × V0(эл-т)) / (С1Сu(орг. Б) × V1орг.Б) × 100 %** (12)

где **С1Сu(эл-т) –** концентрация меди в электролите в 1-й день, г/л; **V1(эл-т) –** объем электролита в 1-й день, л; **С0Сu(эл-т) –** исходнаяконцентрация меди в электролите, в основном всегда равна 0; **V0(эл-т) –** объем исходного электролита, л; ( **С0Сu(эл-т) × V0(эл-т)** данный показатель на момент запуска обычно равен 0, если не используется какой либо электролит имеющий в составе медь); **С1Сu(орг.Б)** – концентрация меди в богатой органике в 1-й день ре-экстракции, г/л; **V1орг. Б –** объем богатой органики в 1-й день, л.

Соответственно во второй цикл или день расчет извлечения меди в электролит из богатой органики будет иметь формулу (13):

**Е2Сu (эл-т), из орг. = (С2Сu(эл-т) × V2(эл-т) – С1Сu(эл-т) × V1(эл-т)) / (С2Сu(орг. Б) × V2орг.Б) × 100 %** (13)

где **С2Сu(эл-т) –** концентрация меди в электролите во 2-й день, г/л; **V2(эл-т) –** объем электролита во 2-й день, л; **С1Сu(эл-т) –** концентрация меди в электролите в 1-й предшествующий день, г/л; **V1(эл-т) –** объем электролита в 1-й предшествующий день, л; **С2Сu(орг.Б)** – концентрация меди в богатой органике во 2-й день ре-экстракции, г/л; **V2орг. Б –** объем богатой органики во 2-й день, л.

Общее итоговое извлечение меди из руды рассчитывается в зависимости от количества процессов. Так, простое выщелачивание до запуска экстракционных процессов будет рассчитываться согласно приведенной ранее формуле (3). С включением экстракции расчет итогового извлечения меди из руды предусматривает баланс металла, переведенного из продуктивного раствора в электролит органической фазой и остаточное содержание меди в рафинате, используемом при повторном выщелачивании. Расчет извлечения с запуском экстракции будет производится по формуле (14):

**ЕCu = (С2Сu(п.р-р) × V2п.р-ра – С1Сu раф × V1раф + С1Сu(эл-т) × V1(эл-т)) / mCu.исх × 100 %** (14)

где **С2Сu(п.р-р)** – концентрация меди в продуктивном растворе во 2-й день экстракции, г/л; **V2п.р-ра –** объем продуктивного раствора во 2-й день, л; **С1Сu(раф)** – концентрация меди в рафинате в 1-й день экстракции, г/л; **V1раф –** объем рафината в 1-й день, л; **С1Сu(эл-т) –** концентрация меди в электролите в 1-й день; **V1(эл-т) –** объем электролита в 1-й день, л; **mCu.исх** - масса меди содержащейся в исходной руде, г. Для первого дня запуска экстракционных процессов, общее извлечение рассчитывается по формуле (3), т.к. рафинат по сути представлен оборотным продуктивным раствором.

**Пример 5:** Для перколяционного выщелачивания загружено 250 кг руды с содержанием меди 0,24 %. По формуле (1) масса меди в руде составит:

**mCu.исх = 0,24 %× 250 000 г /100% = 600 г**

Выщелачивание оборотным раствором велось в течение 10 дней, до достижения концентрации меди в растворе 1,5 г/л. Объем выщелачивающего раствора поддерживался на уровне 40 л (потери объемов в продуктивном растворе находились в диапазоне 0,5-1,5 л). Расчет извлечения для каждого дня производился по формуле (3). Так, для 11 дня на момент запуска экстракции извлечение меди (**Е(11)**) в продуктивный раствор при концентрации 1,5 г/л и объеме 40 л составило:

**Е(11)Cu = (1,5 г/л× 40 л) / 600 г× 100 % = 10,0 %**

Динамика изменения показателей извлечения в течение периода выщелачивания без экстракции отражена в разделе I таблицы 3.

Начиная с 11 дня, при запуске экстракции и ре-экстракции начата наработка раствора электролита, без включения электролиза с осаждением меди на катодах. По техническим рекомендациям при запуске электролиза, в растворах электролита необходимо поддерживать концентрацию меди не менее 30 г/л (для бедного электролита) и не более 60 г/л (для богатого электролита). Наработка электролита осуществлялась в течение недели с 12 по 18 день всего эксперимента. Объем органики составлял 5 л. Концентрация меди на предыдущий 17-й день в электролите объемом 5 л составляла 45,7 г/л, концентрация меди в продуктивном растворе (18-й день) 0,85 г/л (объем 40 л), в рафинате предыдущего дня 0,2 г/л (объем 39,5 л). На 18 день процесса извлечение **Е(18)Cu** согласно формуле (15) составит:

**Е(18)Cu = (0,85 г/л× 40 л - 0,2 г/л× 40 л + 45,7 г/л× 5 л ) / 600 г× 100 % = 42,43 %**

Из продуктивного раствора органической фазой в электролит будет перенесена медь. При этом концентрация меди в электролите повысится с 45,7 г/л до 51,5 г/л. Таким образом, извлечение меди из продуктивного раствора в электролит на 18 день согласно формулам (6-7) составит:

**Е18Сu (эл-т), из п. р-ра = (51,5 г/л × 5 л – 45,7 × 5 л / (0,85 г/л × 40 л) × 100 % = 85,29 %**

Концентрация меди в обедненной органике после ре-экстракции на 18-й день **С18Сu(орг)О** будет вычислена по формуле (9), концентрация в рафинате после обработки составила 0,12 г/л, ранее рассчитанная концентрация меди в бедной органике предыдущего дня **С17Сu(орг)О** = 0,25 г/л:

**С18Сu(орг)О** = (**(0,85 г/л × 40 л – 0,12 г/л × 40 л) – (51,5 г/л × 5л – 45,7 г/л × 5 л)) / 5 л + 0,25 г/л = 0,29 г/л**

В богатой органике перед ре-экстракцией в данный период **С18Сu(орг)Б** содержание меди будет вычислено по формуле (10):

**С18Сu(орг)Б** = (**(0,85 г/л × 40 л – 0,12 г/л × 40 л) / 5 л + 0,25 г/л = 6,09 г/л**

Извлечение меди в электролит из насыщенной богатой органики **ЕСu(эл-т), из орг. %** будет рассчитано по формуле (12). В качестве исходных данных будут взяты показатели концентрация меди в богатой органике 6,09 г/л на 18-й день, концентрация меди в электролите на 17 (45,7 г/л) и 18 (51,5 г/л) дни процесса и объемы растворов. Извлечение меди в электролит из органики составит:

**Е18Сu (эл-т), из орг. = (51,5 г/л × 5 л – 45,7 г/л × 5 л) / (6,09 × 5 л) × 100 % = 95,27 %**

Динамика изменения показателей извлечения и других параметров при выщелачивании с параллельной экстракцией отражена в разделе II таблицы 15.

**3. Расчет извлечения полученного металла на катоде из богатого раствора. Комбинированная (несколько выборочных технологических стадий) или полная схема извлечения (сквозное извлечение – от руды до катодного металла).**

Накопление меди в электролите не должно превышать 60 г/л, т.к. при превышении данной концентрации будет возникать кристаллизация раствора. Минимальным рекомендуемым показателем концентрации меди в электролите считается 30 г/л. После установления в электролите нужного диапазона концентрации меди запускается процесс электролиза. Обычно сдирка катодов и их взвешивание производится на 7 день электролиза. Теоретическая масса осажденной (прирост) на катодах меди (**m+Cu-катод**) рассчитывается на основании показателей концентраций бедного и богатого электролита по формуле (15):

**m1+Cu-катод = (С1Сu(эл-т)Б × V1(эл-т)Б – С1Сu(эл-т)О × V1(эл-т)О)** (15)

где **С1Сu(эл-т)Б –** концентрация меди в богатом электролите в 1-й день, г/л; **V1(эл-т)Б –** объем богатого электролита в 1-й день, л; **С1Сu(эл-т)О –**концентрация меди в обедненном электролите; **V1(эл-т)О –** объем обедненного электролита, л; Для второго дня формула примет вид (16):

**m2+Cu-катод = (С2Сu(эл-т)Б × V2(эл-т)Б – С2Сu(эл-т)О × V2(эл-т)О)** (16)

где **С2Сu(эл-т) –** концентрация меди в богатом электролите во 2-й день, г/л; **V2(эл-т) –** объем богатого электролита во 2-й день, л; **С2Сu(эл-т)О –** концентрация меди в обедненном электролите во 2-й день, г/л; **V2(эл-т)О –** объем обедненного электролита во 2-й день, л;

Общая масса меди на катодах будет рассчитываться суммированием ежедневного прироста по формуле (17):

**m*n*Cu-общ = m1+Cu-катод + m2+Cu-катод +….. + m*n*+Cu-катод** (17)

Сквозное извлечение меди из руды до катодного металла на определенный n-й день **Enсквоз.** рассчитывается по формуле (18):

**Enсквоз. = m*n*Cu-общ / mCu.исх × 100 %**  (18)

В формулах расчетов остальных параметров и показателей извлечения произойдут некоторые изменения с момента ввода в процесс электролиза. Так, при расчете концентрации меди в бедной органике, на второй день запуска электролиза, будет необходимо отнимать показатель прироста меди на катод предыдущего дня. Так, при изменении формулы (9) она примет вид (19):

**С2Сu(орг) О = ((С2Сu(п.р-р) × V2п.р-ра – С2Сu раф × V2раф) – (С2Сu(эл-т) × V2(эл-т) – С1Сu(эл-т) × V1(эл-т)) -** **m1+Cu-катод) / V2орг + С1Сu(орг) О** (19)

Формула расчета (12-13) извлечения меди в электролит из богатой органики будет дополнительно включать показатель прироста меди на катодах предыдущего дня. Так, на второй день электролиза изменения в уравнении придадут формуле следующий вид (20):

**Е2Сu (эл-т), из орг. = (С2Сu(эл-т) × V2(эл-т) – С1Сu(эл-т) × V1(эл-т) + m1+Cu-катод) / (С2Сu(орг. Б) × V2орг.Б) × 100 %** (20)

Аналогичное включение в уравнение будет при расчете извлечения меди из продуктивного раствора в электролит. В формулы (6-7) будет также включаться показатель прироста меди на катодах предыдущего дня. Так, например, для второго дня после запуска электролиза, общий вид формулы станет (21):

**Е2Сu (эл-т), из п. р-ра = (С2Сu(эл-т) × V2(эл-т) – С1Сu(эл-т) × V1(эл-т) + m1+Cu-катод) / (С2Сu(п.р-р) × V2п.р-ра) × 100 %**  (21)

Общее итоговое извлечение меди из руды при запуске всех технологических стадий будет включать в себя баланс меди в продуктивном растворе, рафинате, электролите и общего количества металла на момент расчета. Расчет извлечения с запуском экстракции и электролиза будет производится аналогично формуле (14), но с прибавлением меди осажденной на катодах. Так, например, на второй день запуска электролиза формула примет вид (22):

**Е2Cu = (С2Сu(п.р-р) × V2п.р-ра – С1Сu раф × V1раф + С1Сu(эл-т) × V1(эл-т) +m1Cu-общ) / mCu.исх × 100 %** (22)

**Пример 6:** (продолжение Примера 5). На 19-й день концентрация меди в электролите объемом 5 л достигла 57,3 г/л. Был запушен процесс электролиза. Концентрация меди в обедненном после электролиза электролите составила 52,5 г/л. Согласно формуле (15) масса прироста меди на катодах на 19-й день (1-й день запуска электролиза) будет:

**m19+Cu-катод = (57,3 г/л × 5 л – 52,5 г/л × 5 л) = 24 г**

На 20-й день концентрация меди в электролите объемом 5 л составила 58,6 г/л. Концентрация меди в обедненном после электролиза электролите составила 45,9 г/л. Согласно формуле (15) масса прироста меди на катодах на 20-й день (2-й день запуска электролиза) будет:

**m20+Cu-катод = (58,6 г/л × 5 л – 45,9 г/л × 5 л) = 63,5 г**

Общая масса меди на катодах на 20-й день (за два дня электролиза), согласно формуле (17) составит:

**m20Cu-общ = 24 г + 63,5 г = 87,5 г**

Сквозное извлечение, рассчитанное по формуле (18) будет составлять:

19-й день **E19сквоз. = 24 г/ 600 г × 100 % = 4,0 %**

20-й день **E20сквоз. = 87,5 г/ 600 г × 100 % = 14,58 %**

При массе меди на катодах на 30-й день 398,5 г

**E30сквоз. = 398,5 г/ 600 г × 100 % = 66,42 %**

Концентрация меди в обедненной органике исходя будет рассчитана исходя из формулы (19). При расчете на 30-й день процесса продуктивный раствор содержал 0,3 г/л меди (**С30Сu(п.р-р)**)при объеме 39,5 л (**V30п.р-ра**); рафинат – 0,05 г/л (**С30Сu раф**) с тем же объемом (**V30раф**); показатели электролита объемом 5 л (**V30(эл-т)**) на 30–й день составляли 32,0 г/л (**С30Сu(эл-т)**), на предыдущий 29-й день 32,8 г/л (**С29Сu(эл-т)**) и объемом 5 л (**V29(эл-т)**); предшествующий прирост меди на катоды составил 14 г (**m29+Cu-катод**); объем органики 5 л (**V30орг**), предыдущая концентрация меди в бедной органике равнялась 0,21 г/л (**С29Сu(орг)О**).

**С30Сu(орг)О = ((0,3 г/л × 39,5 л – 0,05 г/л × 39,5 л) – (32,0 г/л × 5 л – 32,8 г/л × 5 л) – 14 г) / 5 л + 0,021 г/л = 0,18 г/л**

Расчет концентрации меди в богатой органике после запуска электролиза остается прежним без ввода в уравнение дополнительных значений. Так, согласно формуле (10), концентрация меди в богатой органике на 30-й день будет:

**С30Сu(орг) Б = (0,3 г/л × 39,5 л – 0,05 г/л × 39,5 л) / 5 л + 0,21 г/л = 2,18 г/л**

Извлечение меди из богатой органики в электролит на 30-й день будет рассчитано согласно формуле (20):

**Е30Сu (эл-т), из орг. = (32,0 г/л × 5 л – 32,8 г/л × 5 л + 14 г) / (2,18 г/л × 5 л) × 100 % = 91,58 %**

Расчет извлечения (переноса) меди из продуктивного раствора в электролит для 30-го дня составит согласно формуле (21):

**Е30Сu (эл-т), из п. р-ра = (32,0 г/л × 5 л – 32,8 г/л × 5 л + 14 г) / (0,3 г/л × 39,5 л) × 100 % = 84,39 %**

Общее итоговое извлечение с момента запуска всех технологических стадий согласно формуле (22) будет включать в уравнении прибавление меди, осажденной на катодах. Для 30-го дня итоговое извлечение составит:

**Е30Cu = (0,3 г/л × 39,5 л – 0,05 г/л × 39,5 л + 32,8 г/л × 5 л + 388 г) / 600 г × 100 % = 93,65 %**

По завершению всего процесса рассчитывается итоговый баланс меди:

| Итоговый баланс: | | Остаток в руде, Cu %: | | 8,18 |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | В рафинате, Cu %: | | 0,33 |
|  |  | В электролите, Cu %: | | 24,92 |
|  |  | В органике, Cu %: | | 0,15 |
|  |  | На катодах, Cu %: | | 66,4 |
|  |  |  |  | 100,00 |

Динамика изменения показателей извлечения и других параметров при запуске всех технологических процессов отражена в таблице 15 в продолжающемся разделе III. Все расчеты также представлены в файле Excel.

Таблица 15 – показатели извлечения меди и других параметров жидкостно-экстракционной технологии выщелачивания

| Раздел | **Сутки/ стадии** | Экстракция | | | | Органика | | | Ре-Экстракция | | | | Электролиз | | | | | **Общее итоговое извлечение, ЕИ, %** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ССu(п.р-р), г/л** | **ССu(раф), г/л** | **Vр-ра, л** | **ЕСu (экст), %** | **ССu(орг) Б, г/л** | **ССu(орг) О, г/л** | **Vорг, л** | **ССu(эл-т) Б, г/л** | **Vэл-т Б, л** | **ЕСu (эл-т), из орг. %** | **ЕСu (эл-т), из прод. р-ра %** | **ССu(эл-т) О, г/л** | **Vэл-т О, л** | **Прирост m+Cu-катод, г** | **Общая масса накопленной Cu, г** | **Сквозное извлечение меди из руды до металла, %** |
| **I** | 1 | 0,5 | 0,5 | 40,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | - | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 3,33 |
| 2 | 0,65 | 0,65 | 40,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | - | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 4,33 |
| 3 | 0,8 | 0,8 | 39,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | - | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 5,27 |
| 4 | 0,9 | 0,9 | 39,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | - | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 5,85 |
| 5 | 1,05 | 1,05 | 38,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | - | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 6,74 |
| 6 | 1,1 | 1,1 | 40,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | - | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 7,33 |
| 7 | 1,15 | 1,15 | 40,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | - | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 7,67 |
| 8 | 1,2 | 1,2 | 39,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | - | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 7,90 |
| 9 | 1,3 | 1,3 | 40,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | - | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 8,67 |
| 10 | 1,4 | 1,4 | 40,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,0 | 0,0 | 5,0 | - | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 9,33 |
| 11 | 1,5 | 0,3 | 40,0 | 80,00 | 9,60 | 0,60 | 5,0 | 9,0 | 5,0 | 93,75 | 75,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 10,00 |
| II | 12 | 0,8 | 0,15 | 39,5 | 81,25 | 5,74 | 0,24 | 5,0 | 14,5 | 5,0 | 95,90 | 87,03 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 10,77 |
| 13 | 0,9 | 0,18 | 39,0 | 80,00 | 5,85 | 0,25 | 5,0 | 20,1 | 5,0 | 95,71 | 79,77 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 16,95 |
| 14 | 1,05 | 0,17 | 39,5 | 83,81 | 7,20 | 0,20 | 5,0 | 27,1 | 5,0 | 97,18 | 84,39 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 22,49 |
| 15 | 0,95 | 0,15 | 40,0 | 84,21 | 6,60 | 0,20 | 5,0 | 33,5 | 5,0 | 96,93 | 84,21 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 27,80 |
| 16 | 0,91 | 0,16 | 39,5 | 82,42 | 6,13 | 0,13 | 5,0 | 39,5 | 5,0 | 97,91 | 83,46 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 32,91 |
| 17 | 1,0 | 0,2 | 39,5 | 80,00 | 6,45 | 0,25 | 5,0 | 45,7 | 5,0 | 96,15 | 78,48 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 38,45 |
| 18 | 0,85 | 0,12 | 40,0 | 85,88 | 6,09 | 0,29 | 5,0 | 51,5 | 5,0 | 95,27 | 85,29 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 42,43 |
| III | 19 | 0,87 | 0,14 | 39,5 | 83,91 | 6,06 | 0,26 | 5,0 | 57,3 | 5,0 | 95,79 | 84,39 | 52,5 | 5,0 | 24,0 | 24,0 | 4,00 | 47,84 |
| 20 | 0,9 | 0,12 | 39,0 | 86,67 | 6,34 | 0,24 | 5,0 | 58,6 | 5,0 | 96,23 | 86,89 | 45,9 | 5,0 | 63,5 | 87,5 | 14,58 | 56,68 |
| 21 | 0,95 | 0,14 | 39,5 | 85,26 | 6,64 | 0,14 | 5,0 | 52,4 | 5,0 | 97,92 | 86,61 | 42,2 | 5,0 | 51,0 | 138,5 | 23,08 | 68,89 |
| 22 | 0,85 | 0,12 | 39,5 | 85,88 | 5,91 | 0,20 | 5,0 | 47,9 | 5,0 | 96,53 | 84,88 | 40,0 | 5,0 | 39,5 | 178,0 | 29,67 | 71,42 |
| 23 | 0,85 | 0,12 | 39,0 | 85,88 | 5,90 | 0,20 | 5,0 | 45,7 | 5,0 | 96,63 | 85,97 | 39,0 | 5,0 | 33,5 | 211,5 | 35,25 | 74,32 |
| 24 | 0,8 | 0,11 | 39,5 | 86,25 | 5,65 | 0,15 | 5,0 | 44,5 | 5,0 | 97,35 | 87,03 | 36,9 | 5,0 | 38,0 | 249,5 | 41,58 | 77,82 |
| 25 | 0,75 | 0,11 | 39,5 | 85,33 | 5,21 | 0,11 | 5,0 | 42,0 | 5,0 | 97,96 | 86,08 | 33,2 | 5,0 | 44,0 | 293,5 | 48,92 | 82,88 |
| 26 | 0,75 | 0,12 | 39,0 | 84,00 | 5,02 | 0,12 | 5,0 | 38,1 | 5,0 | 97,61 | 83,76 | 30,5 | 5,0 | 38,0 | 331,5 | 55,25 | 88,07 |
| 27 | 0,7 | 0,12 | 39,0 | 82,86 | 4,64 | 0,14 | 5,0 | 35,0 | 5,0 | 96,90 | 82,42 | 30,5 | 5,0 | 22,5 | 354,0 | 59,00 | 90,77 |
| 28 | 0,55 | 0,1 | 40,0 | 81,82 | 3,74 | 0,14 | 5,0 | 34,1 | 5,0 | 96,15 | 81,82 | 30,1 | 5,0 | 20,0 | 374,0 | 62,33 | 91,05 |
| 29 | 0,4 | 0,05 | 39,5 | 87,50 | 2,91 | 0,21 | 5,0 | 32,8 | 5,0 | 92,82 | 85,44 | 30,0 | 5,0 | 14,0 | 388,0 | 64,67 | 92,72 |
| 30 | 0,3 | 0,05 | 39,5 | 83,33 | 2,18 | 0,18 | 5,0 | 32,0 | 5,0 | 91,58 | 84,39 | 29,9 | 5,0 | 10,5 | 398,5 | 66,42 | 93,65 |